変調方式の基礎とシステム・レベル・シミュレーション

―― ディジタル変調の動作をシミュレータで視覚的に確認

第2章

原田博司

通信装置などの方式設計やシステム設計では，信号処理用のシステム・レベル・シミュレータ（MATLAB/Simulinkなど）がよく利用される．ここでは，まず，ワイヤレス通信を取り巻く状況について述べ，各種ディジタル変調がどのような応用で使われているかを説明する．次に，ディジタル無線機の構成と各種変調方式の基本原理について説明する．後半では，実際にシミュレータを使ってディジタル変調の信号処理を模擬し，その動作を視覚的に確認する．　　（編集部）

ここでは，まず，ディジタル移動通信やワイヤレス・アクセスで用いられる変調方式の基礎について解説します．続いて，QPSK（quadrature phase shift keying；直交位相シフト変調）やQAM（quadrature amplitude modulation；直交振幅変調）を利用した送信機を例に，米国The MathWorks社の「Simulink」を用いて設計を行い，システム・レベルのシミュレーションを実施します．

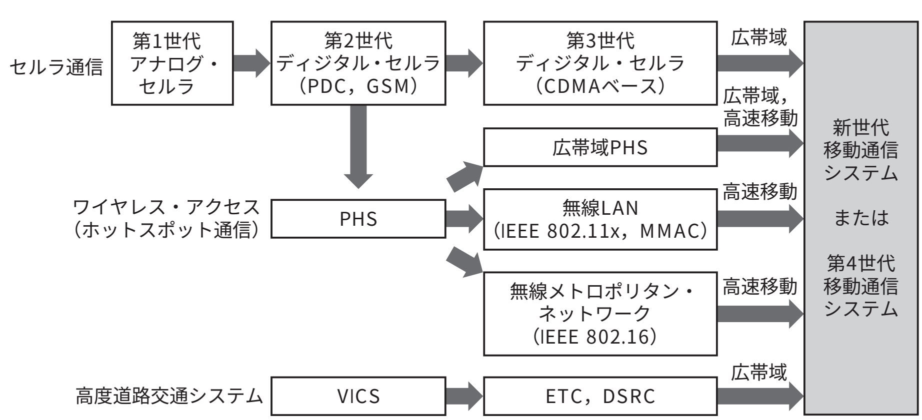
1．ワイヤレス通信を取り巻く状況

現在のワイヤレス通信技術は，**図1**に示すようにさまざまな切り口から研究開発が進められています．その一つは，基地局を中心とする“セル”と呼ばれるカバー・エリアを設定して，基地局とユーザの間でワイヤレス通信を行うセルラ移動通信システムです．

● 世代を重ねるセルラ移動通信システム

1980年代に利用可能となった，いわゆる第1世代のアナログ・セルラ移動通信は，狭帯域化と各種ディジタル・メディアとの融合を目ざしました．

1990年代になると，PDC（personal digital cellular），GSM（global system for mobile communications）といった第2世代のディジタル・セルラ移動通信システムが運用



CDMA：code division multiple access
ETC　：electronic toll collection
PDC　：personal digital cellular
PHS　：personal handyphone system
DSRC ：dedicated short range communication
GSM　：global system for mobile communications
MMAC：Multimedia Mobile Access Communication Systems
VICS ：Vehicle Information and Communication System

図1
移動通信システムの動向
現在，セルラ移動通信（例えば携帯電話）や無線LAN，ITS（intelligent transport systems）など，各種通信システムが存在する．ユーザは現状，適材適所で無線機そのものを取り替えて運用している．

を始めました．このときは，時間を一定の間隔で区切り，その区切られた時間を複数のユーザが共有するTDMA（time division multiple access；時分割多元接続）方式が採用されました．

また，1990年代に台頭してきたインターネットなどとの有機的な結合を目ざし，2000年代に入ると高速な第3世代のディジタル・セルラ移動通信サービスが開始されました．第3世代では，第2世代のTDMAに代わって，CDMA（code division multiple access；符号分割多元接続）方式が用いられるようになりました．

● PHSに端を発する三つの無線アクセスの流れ

その一方で，第2世代ディジタル・セルラ移動通信の開発時期に，家庭のコードレス電話が普及しました．このコードレス電話をそのまま屋外に持ち歩き，セルラ移動通信のようなサービスを行おうとする流れが生まれました．それがPHS（personal handyphone system）です．PHSは当初，高速移動体としての通信はサポートしていませんでした．第2世代のディジタル・セルラ移動通信と比べて，データの伝送速度が速いことが大きな特徴でした．また，基地局との接続だけでなく，構内電話など，自分の好きな場所で自営的に通信エリアを構築できるということも一つの特徴でした．

このPHSは，現在，三つの流れを作り出しています．

一つは，高能率変調方式を用いてPHSを高速化させるという流れです（広帯域PHS）．もう一つは，無線LAN（local area network）の流れです．これは米国IEEE（The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.）の802.11という委員会で標準化が進められ，現在，54Mbpsの伝送速度で通信可能な規格が実際に利用されています．日本でもMMAC（Multimedia Mobile Access Communication Systems）推進協議会や電波産業界（ARIB）などが「HiSWAN」という名称で同等の通信システムの標準化を行っています．

また，有線を敷設できないエリアに無線のワイヤレス・アクセス・リンクを供給するFWA（fixed wireless network）にもその流れが波及しており，IEEE 802.16という委員会で無線メトロポリタン・ネットワークの標準化が行われています．この三つの流れには，高速移動体との通信はあまり期待していないものの，静止，もしくは準静止のユーザに対して高速なディジタル・データを無線で供給し，公衆の回線ではなく自営でワイヤレス・ネットワークを構築できるという特徴があります．

この自営系ネットワークの拡大を後押ししたものの一つがインターネットの普及です．従来は公衆網という各種電気通信事業者が持っている専用回線を利用することが通信の主体でした．ところが，自営で自由に有線ネットワークを構築し，その有線ネットワークの間をくもの巣のように接続するインターネットが普及しました．これとともに，無線の自営系ワイヤレス・ネットワークも普及していったのです．

● 自動車を対象とする無線アクセスの需要が拡大

またこれとは別に，高度道路交通システム（intelligent transport systems）においても道路を走行する高速の移動体に対して通信を行う需要が出てきました．

最初はVICS（Vehicle Information and Communication System）といった道路走行上で必要となる情報（渋滞情報など）を低速ながら広域の高速移動体に供給するというものでしたが，1990年代のETC（electronic toll collection；自動料金収受）システムの開発により，高速の移動体に対する通信にも広帯域化の流れが押し寄せてきました．ETCでは高速の移動体に対して，約1Mbps程度の速度で情報を伝送することが可能です．そして，クレジット・カード情報などの秘匿情報も通信できるようになりました．

この技術をベースに，伝送速度を最大4Mbps程度まで引き上げ，自動料金収受のみならず，インターネット接続などの情報通信も行おうという通信規格がDSRC（dedicated short range communication；専用狭域通信）システムです．

● 第4世代は「広帯域化＋高速移動体への追随」

ワイヤレス・アクセスのシステムに関して，さまざまな流れが存在します．しかし，現在，この流れがある一つの方向に集約されつつあります．それは，「広帯域化＋高速移動体への追随」という流れです．これが第4世代移動通信システム，あるいは新世代移動通信システムと呼ばれているものです．この移動通信システムでは，高速の移動体に対する伝送速度として数十Mbpsを目ざしており，静止，もしくは準静止のユーザに対しては数百Mbps，最大1Gbpsの伝送速度を検討しているところもあります．今後，2010年ごろをメドに，こうした新しい通信システムの開発が進んでいくことになります．

変復調方式の面から考えると，今後の方向性は，基本的

にはシンプルです．用いられている変調方式は直交変調になります．日本の第2世代の携帯電話システムやPHSは，ともにπ/4シフトQPSKと呼ばれる直交変調方式を利用しています．また，第3世代のディジタル・セルラ移動通信システムではCDMAが用いられていますが，この方式は基本的には直交変調方式をベースとしています．無線LANではOFDM（orthogonal frequency division multiplexing；直交周波数分割多重）という伝送方式が採用されており，これも直交変調方式の仲間です．以下では，これらの変調方式の基礎について解説していきます．

2．ディジタル変調方式の基礎

基本的な変調方式の概要を**図2**に示します．「変調」とは，基本的には**図2**の左下に示したある周波数帯の信号を同図の左上の情報を用いて変化を与える処理です．

● 信号の振幅，周波数，位相に変化を与えて情報伝送

図2の左下に示した信号は，以下の式で表現することができます．

$$S(t) = A(t)\cos\left(2\pi f_c(t)t + \theta(t)\right) \qquad (1)$$

ここで$A(t)$は振幅，$f_c(t)$は通信する信号の周波数，そして$\theta(t)$は位相です．**図2**の左上にある情報を用いて，この三つのパラメータに変化を与えます．振幅に変化を与えて情報を送信する方式をAM（amplitude modulation；振幅変調）またはASK（amplitude shift keying；振幅シフト変調），周波数に変化を与えて情報を送信する方式をFM（frequency modulation；周波数変調）またはFSK（frequecy shift keying；周波数シフト変調），そして位相に変化を与えて情報を送信する方式をPM（phase modulation；位相変調）もしくはPSK（phase shift keying；位相シフト変調）と呼びます（AM，FM，PMはアナログ変調，ASK，FSK，PSKはディジタル変調）．また，振幅，位相ともに情報を載せて，さらなる高能率伝送を行う方式などもあります．

● ディジタル無線機の基本構成は共通

基本的なディジタル無線機の構成を**図3**に示します．

送信信号に対して，まず，情報の圧縮などの情報源符号化が適用されます．そして，移動通信などで生じる多くの反射波からなる電波伝搬路のような劣悪な通信路に対して耐性を持たせるため，通信路符号化が適用されます．続いて変調器において，情報であるディジタル・データを用いて無線（RF）信号に変調をかけます．そして，通信路に信号が送信されます．

受信機側では，送信された信号を復調器によってディジタル・データに戻します．ただし，このデータに対して通信路において誤り（エラー）が混入しているかもしれません．そこで，送信側で施された通信路符号化を元に戻し（復号し），送信されたディジタル・データを取り出します．ただし，この信号には圧縮などが施されているため，さらに

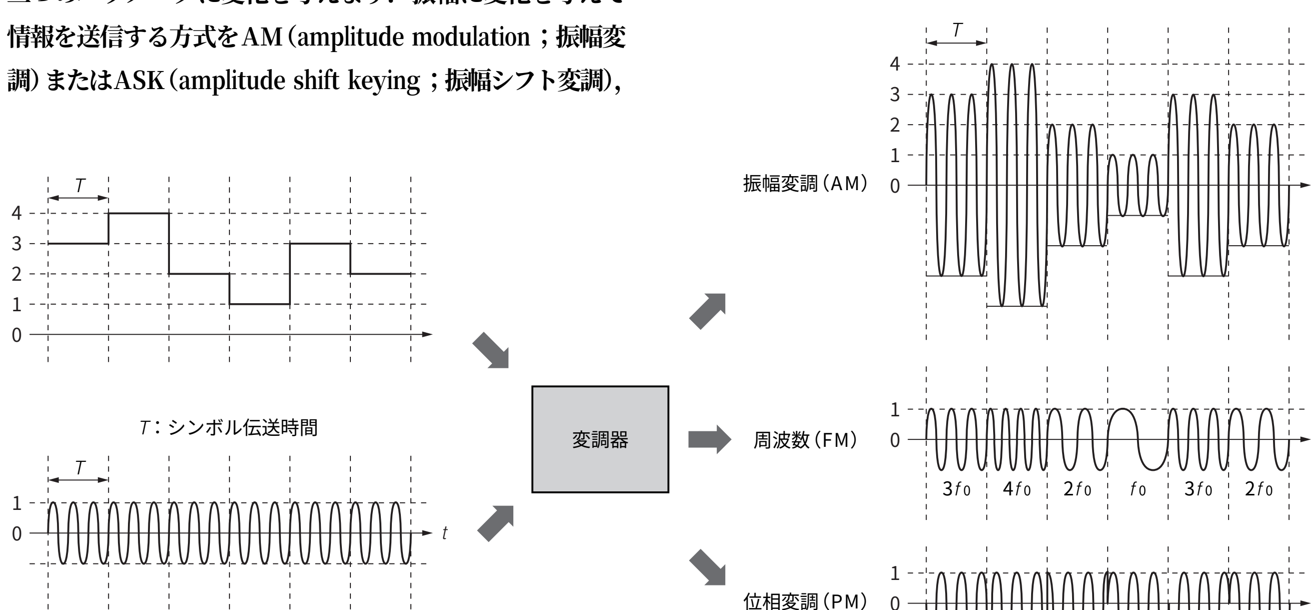


図2　基本的な変調方式
無線周波数帯の信号を伝送するべき情報に合わせて，振幅，周波数，位相のいずれかを変動させて伝送する．

情報源復号化を施す必要があります．こうすることにより，送信された信号の原信号を復元できます．

以上は基本的な構成ですが，実際のディジタル無線機では**図4**に示すように変調器部，復調器部がさらに細かく分かれます．

図4において通信路符号化を適用した信号は，まず，ベースバンド変調器においてディジタル信号処理によって波形が生成されます．その後，変換部においてディジタル信号からアナログ信号に変換され，送信側高周波部において所望の周波数帯に変換され，送信されます．

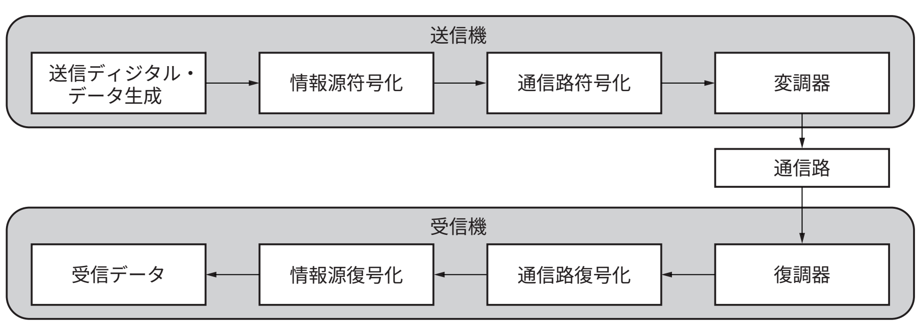
通信路を通った信号は受信側高周波部において無線周波数帯からディジタル信号に変換しやすい周波数帯に変換されます．その後，変換部においてアナログ信号からディジタル信号に変換されます．続いて，ベースバンド復調器においてディジタル信号処理による復調処理が施されます．そして，通信路復号化，情報源復号化が適用されます．本特集で述べるソフトウェア無線技術では，おもに**図4**のディジタル信号処理部について検討を行います．

以上，変調方式の概要と送受信機の構成の概要について述べました．AM（ASK），FM（FSK），PM（PSK）があると述べましたが，とくにPM（PSK）では無線信号が持つ振幅や周波数を変化させる必要がなく，送信アンプに対する影響の軽減や受信時のフィルタの影響の低減を考えると有効な通信方式の一つです．このPM，PSK方式の代表例が，次に説明するBPSK（binary phase shift keying；2相位相シフト変調）です．

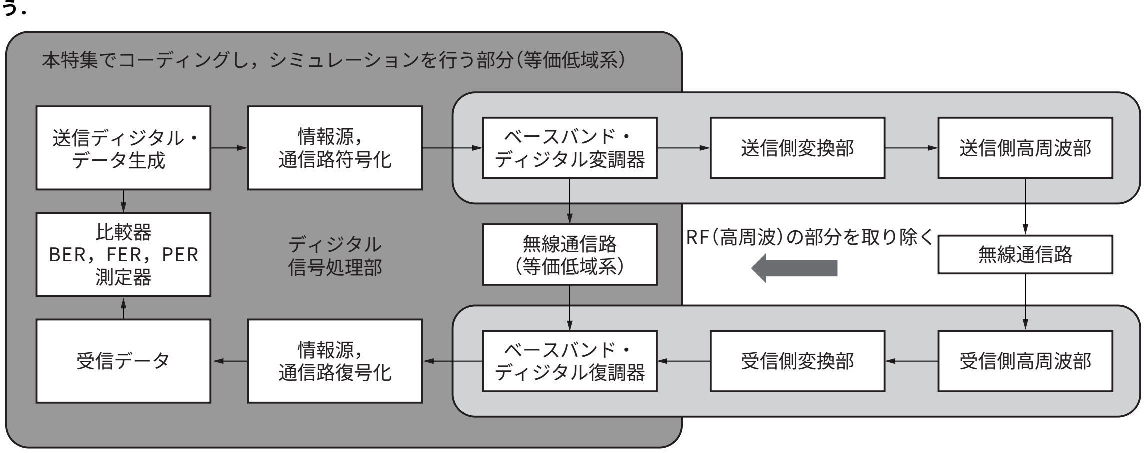
● BPSK：2種類の位相シフトを利用して情報伝送

BPSKでは，式(1)の信号について位相$\theta(t)$を入力2値データ信号に合わせて変化させます．例えばディジタル・データが'0'のときに位相を180°ずらし，ディジタル・データが'1'のときには位相をずらしません．つまり，信号波形は**図5**のようになります．BPSKを用いた送受信機の構成を**図6**に示します．また，送信信号波形の生成のようすを**図7**に示します．

まず最初に，ディジタル信号処理部で送信信号の2値データが生成されます．そして，この2値データには，ある特定の周波数範囲で送信信号波形が収まるように波形整形フィルタがかけられます．このフィルタのかけかたですが，**図7**に示すように，まず，通すフィルタの形を決定します．次に，生成された2値データに対して，フィルタをかけやすいように，間に'0'を挿入します．そして，このデータをフィ



▶**図3 基本的なディジタル無線機の構成**
基本的には9種類のブロックに分けることができる．



▼**図4 実際のディジタル無線機の構成**
本特集のシミュレーションは無線周波数（RF）帯の部分は行わず，そのふるまいを低域系で模擬した等価低域系で行う．

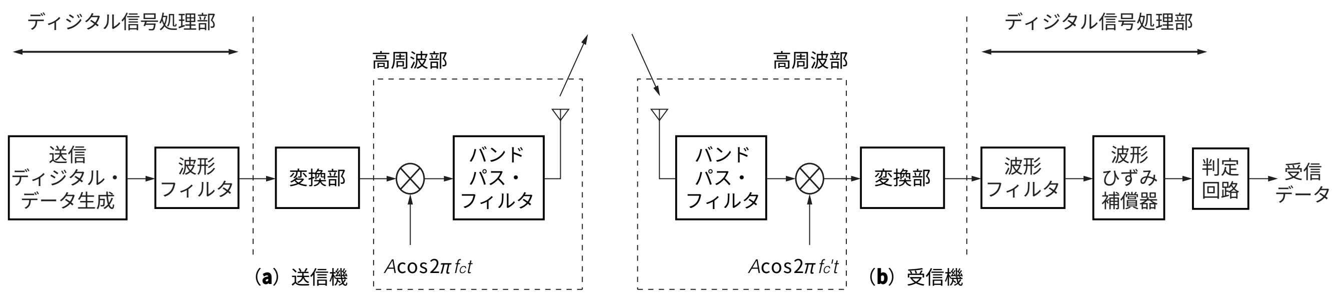


図6 BPSK送受信機の構成

基本的には，信号を生成し，その信号で高周波信号の位相を変化させ，受信側で波形のひずみ補償などを行い，判定器を経て受信信号が生成される．

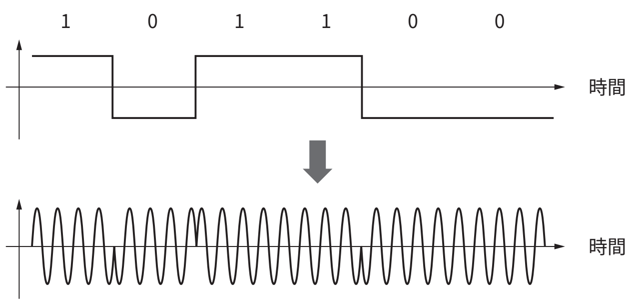


図5 BPSK変調信号の波形

入力信号が“1”の場合は位相を変化させず，“0”の場合は180°位相を変化させている．

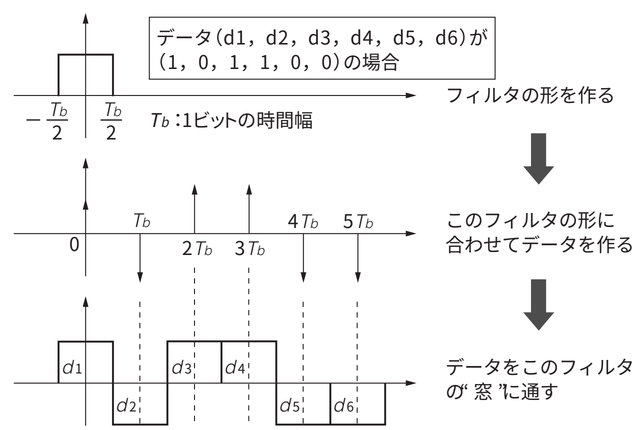


図7 BPSK変調信号の作りかた

データを生成し，波形フィルタの形を作り，フィルタを通すための余裕（マージン）を与え，最後に生成したデータをフィルタに通す．この処理を「畳み込み」という．

ルタの“窓”に通していきます（これを畳み込みと呼ぶ）．

次に，どのようなフィルタをかければよいかを考えてみます．**図8**に示すように，基本的にはT_bを送信信号の一つの2値データの時間幅と仮定すると，**図8**の左側のように，ある特定の周波数帯の中にきれいに収まってもらいたいところです．しかし，これを逆フーリエ変換すると，時間軸上では**図8**の右側のように波を打った形になります．そして，自分の本来のデータを送信している幅T_b以外の時間にも多くのエネルギーが出ており，かならずしも効率的であるとは言えません．そこで，周波数軸上の信号を矩形にするのではなく，少しなまらせてみます．**図9**のように左側の波形を以下の形に変形します．

$$G_N(f)=\begin{cases}1 & 0\leqq|f|\leqq\dfrac{(1-\alpha)}{2T_b}\\ \cos^2\left[\dfrac{T_b}{4\alpha}\left\{2\pi|f|-\dfrac{\pi(1-\alpha)}{2T_b}\right\}\right] & \dfrac{(1-\alpha)}{2T_b}\leqq|f|\leqq\dfrac{(1+\alpha)}{2T_b}\\ 0 & \dfrac{(1+\alpha)}{2T_b}\leqq|f|\end{cases} \quad (2)$$

そしてαの値を大きくしていきます．すると，**図9**の右側の時間軸の波形から，T_b以外の時間に漏れているエネルギーが減っていることがわかります．このように周波数軸上の波形が式(2)で記述できるフィルタを「ナイキスト・フィルタ」と呼びます．また，αのことをロールオフ係数と呼びます．

式(2)を逆フーリエ変換したものを**図7**のフィルタの形として用い，入力データにこのフィルタの窓を通すと，帯域制限された送信信号が形成されます．そして，変換部でディジタル信号からアナログ信号に変換されます．高周波部では所望の周波数帯の信号に変換され，再び帯域制限のフィルタ（バンドパス・フィルタ）がかけられて送信されます．

送信された信号は，通信路を通り，受信側のアンテナで受信されます．その後，受信側高周波部でディジタル信号に変換しやすい周波数帯に変わり，変換部でアナログ信号からディジタル信号に変換されます．ディジタル信号処理

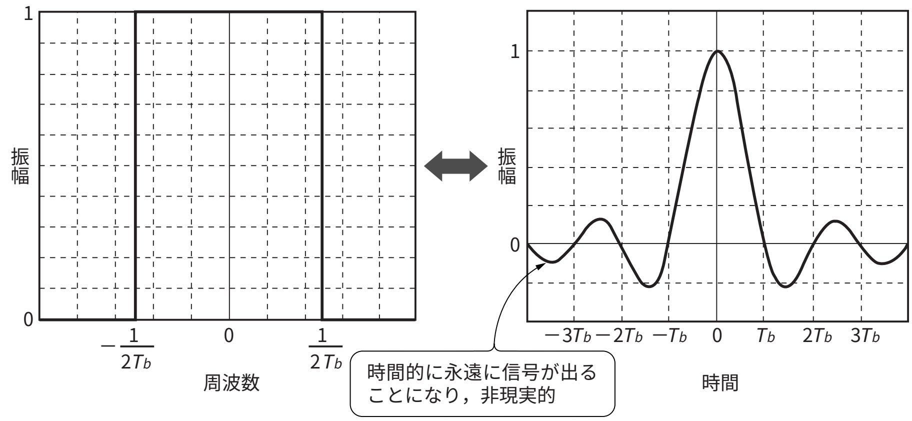


図8
帯域制限の必要性
矩形波をフーリエ変換すると，永遠に続く非現実的な波形が出てくる．

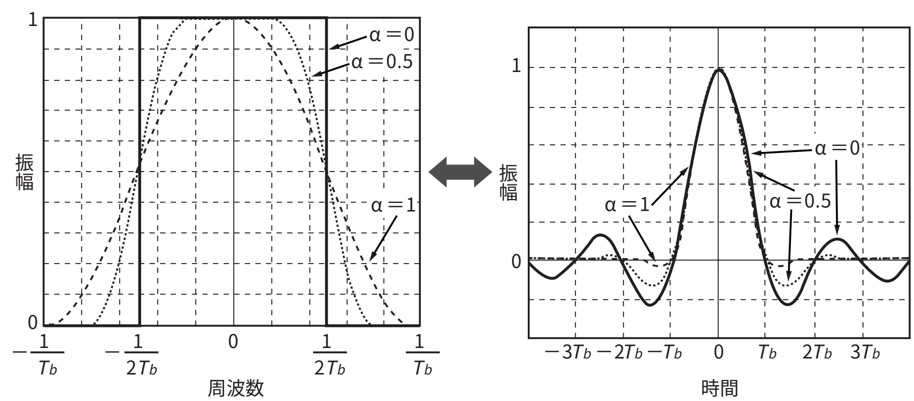


図9
ナイキスト・フィルタ
ナイキスト・フィルタでは，ロールオフ係数を変化させて自分の伝送時間外の不要電波の量を減らす．

部では，まず，必要に応じて波形整形フィルタがかけられます．その後，波形ひずみ補償器において通信路の波形ひずみが補償され，判定回路を通った後，ディジタル信号に変換されます．

BPSKの波形は式(1)の信号の位相θ(t)を，送信データが'0'の場合は位相を180°ずらし，送信データが'1'の場合は位相をずらさないというものです．この信号について，cos(余弦関数)の正の成分をx軸にして，そこから位相と振幅をプロットしたものが**図10**です．BPSKはcosの信号成分を0°と180°しか変化させないため，**図10**のようになります．ここでx軸をcosとすると，sin(正弦関数)信号は位相を90°ずらしたものになるので，y軸になります．そして，このx軸のことを基本になる信号(今回はcos信号)と同相なので「同相成分」，あるいは「I(in-phase)チャネル」といいます．一方，y軸は基本信号より90°位相がずれているので「直交成分」，あるいは「Q(quadrature-phase)チャネル」といいます．

また，オイラーの法則より$\exp(j\theta)=\cos\theta+j\sin\theta$となり，このとき$\cos\theta$は実数(real)部，$\sin\theta$は虚数(imaginary)部になるので，$I$チャネルを「Real部」，$Q$チャネルを「Imag部」と呼ぶこともあります．

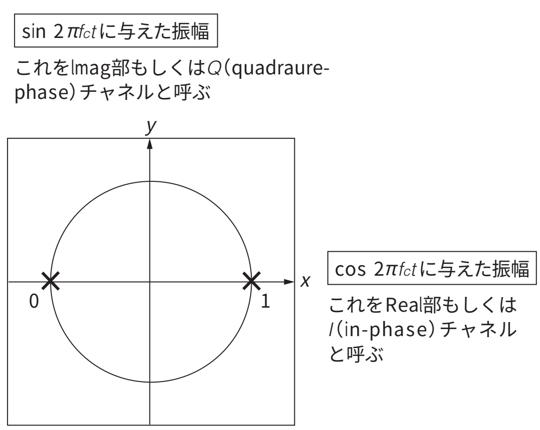


図10　BPSK変調における信号空間ダイヤグラム
各種の位相変調，振幅変調は，信号空間ダイヤグラム上で現在の位相や振幅を表現する．

● QPSK：4種類の位相シフトを利用して高能率伝送

図10に示したように，BPSKでは一つの無線周波数の信号を送信すべき情報に合わせて0°と180°に位相シフトする

ことによって情報を伝えます．しかし，**図10**からも明らかなように，0 °と180 °以外にもさまざまな角度の位相シフトがありそうです．そこに情報を載せることで，BPSKよりも高能率な変調ができると考えられます．

QPSKは，2ビットの情報，すなわち“ 11 ”，“ 10 ”，“ 01 ”，“ 00 ”という四つの状態の信号を，それぞれできるだけ離れた四つの位相に割り当てることによって，情報を伝送する方式です．**図11**の例では，“ 11 ”のデータの場合は45 °位相をずらし，“ 01 ”の場合は135 °ずらし，“ 00 ”のデータの場合は225 °ずらし，“ 10 ”の場合は315 °ずらすと取り決めています．

これを式を使って表現すると，以下のようになります．

$$S(t) = d_I(t)\cos(2\pi f_c t) + d_Q(t)\sin(2\pi f_c t) \qquad (3)$$

0に−1を割り当て，$(d_I(t),\ d_Q(t)) = (1,\ 1),\ (1,\ -1),\ (-1,\ 1),\ (-1,\ -1)$を入力すると，**図11**の信号を生成できます．すなわち，QPSKの信号を生成するには，まず，**図12**に示すように送信信号を$(d_I(t),\ d_Q(t))$という二つの信号に分離します．波形整形フィルタを通した後，Iチャネル側の信号を一つの無線信号に，そしてQチャネル側の信号をIチャネルに掛けた信号を90 °（π/2ラジアン）だけずらした信号に掛け合わせます．これで送信信号波形ができ上がります．その後，それぞれの信号を合成して送信します．

受信側では帯域制限をかけるためにバンドパス・フィルタに通した後，もう一度，送信側と同相成分の信号と直交成分の信号を掛け合わせ，その振幅成分を取り出します．その後，変換部でディジタル信号からアナログ信号に変換し，あとはBPSKと同じ方法で信号の復元を行います．QPSKの送受信機の構成を**図13**に示します．

以上のように，同相成分と直交成分のそれぞれに情報を載せて伝送する変調方式を「直交変調方式」と呼びます．

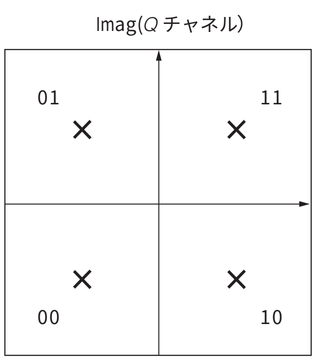


図11　QPSK変調における信号空間ダイヤグラム
QPSKの場合，4点の信号点が存在する．

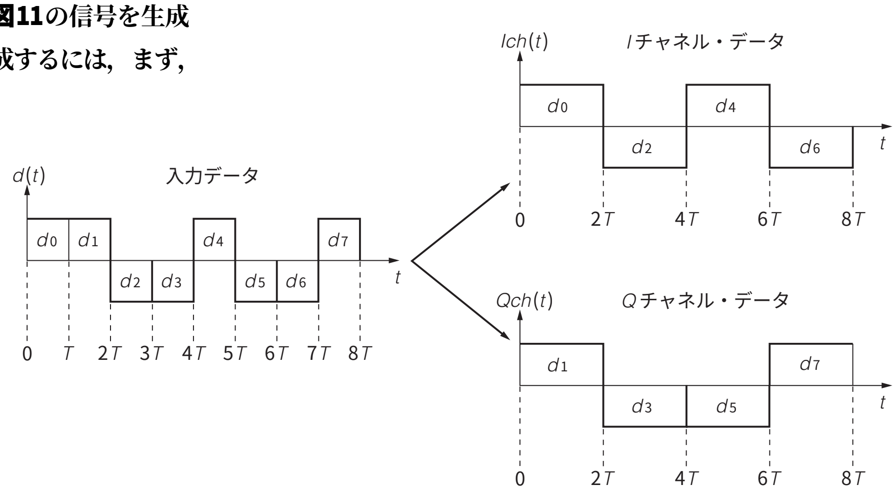


図12　QPSK変調方式の概要
入ってきた信号を二つのチャネルに分け，一方はそのまま無線周波数帯の信号に重畳する．もう一方はその周波数帯の信号に比べて90 °位相が異なる信号に重畳する．

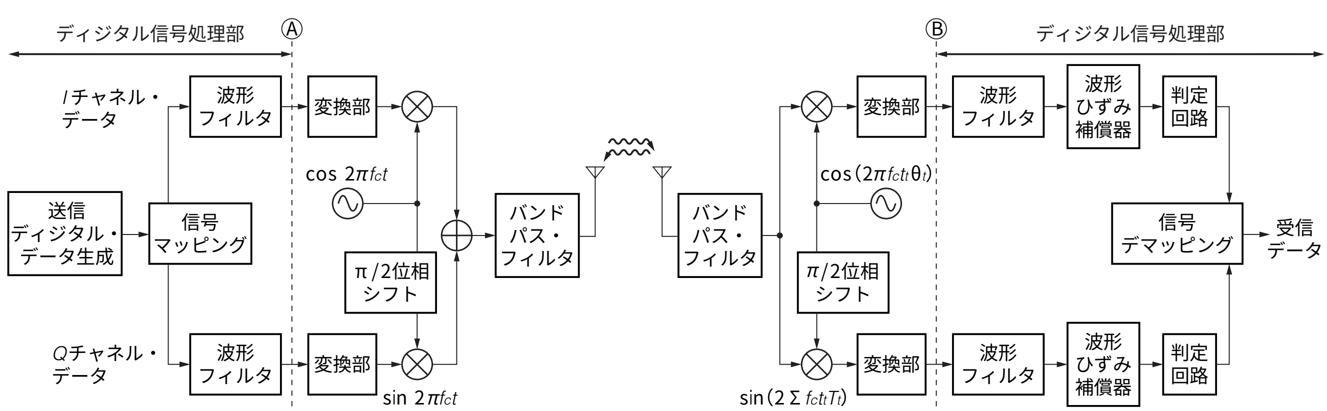


図13　QPSK送受信機の構成
送受信機の構成を示す．シミュレーションは等価低域系で行う．

● QAM：QPSKに振幅変化を加えてさらに高効率

QAMは，QPSKを拡張した変調方式です．QPSKの場合は一定振幅で無線信号の位相だけを変動させます．一方，QAMでは位相だけでなく振幅も変化させます．信号空間ダイヤグラムをQPSKと比較すると，**図14**のような形になります．

ここで16QAMとは，位相と振幅を変動させて16状態の信号点を作成する方式です．そして16状態，つまり4ビットの情報を一度に送ることができます．また，256QAMは256状態，すなわち8ビットの情報を一度に伝送する信号点を作成します．送信機の構成は基本的には**図13**と同じです．ただし，信号マッピングの方法が少し違います．

では一度にmビットの情報を送る場合，式(3)の$d_I(t)$，$d_Q(t)$はどのように計算すればよいのでしょうか？ その例を**リスト1**に示します．表記はMATLABのプログラミング記述です．例えば16QAMで4ビット（"1111"）を伝送する場合，d_Iとして3，d_Qとして3を伝送します．

● 振幅変化を抑制，さらに伝送効率を向上

基本的に，ディジタル無線機ではBPSKやQPSK，QAMを用いることが多いのですが，QPSKでは問題が生じることがあります．**図11**を再び見てください．"11"と"00"の間，もしくは"01"と"10"の間を信号が行き来すると，原点を通過することになります．このとき，振幅が急激に変化するため，送信信号用アンプのダイナミック・レンジを大きくしなければなりません．

そこで，**図15**に示すような信号点配置にする方式が提案されています．この方式では，一つの信号点にいる場合，次の信号が"00"ならば45°回転させた位置に信号点をずらせるように変調をかけ，"10"ならば－45°回転させます．"01"ならば135°回転させ，"11"ならば－135°回転させます．こうすることにより，信号点が変化しても絶対に原点を通ることがなくなり，振幅成分の安定した通信が可能となります．この変調方式は基本的には45°回転させることをベースにしているので，45°（π/4ラジアン）シフトQPSK，もしくはπ/4シフトQPSKと呼びます．

また，さらに伝送効率を引き上げるため，**図16**のような二つの方式が検討されています．いずれも，まずマッピング回路でQPSK信号もしくはQAM信号を複数チャネル作

リスト1　QAMにおける$d_I(t)$，$d_Q(t)$の計算

```
dI = 0;
dQ = 0;
m2=m/2;

for i i= 1 :m2
  dI = dI + 2.^( m2 - ii ) .* paradata2((1,ii+count2);
  dQ = dQ + 2.^( m2 - ii ) .* paradata2((1,m2+ii+count2);
end
```

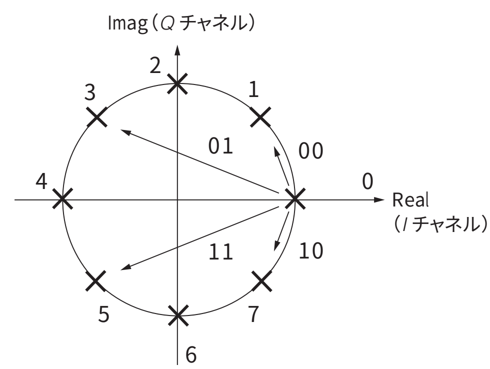


図15　π/4シフトQPSK変調における信号空間ダイヤグラム

π/4シフトQPSK変調では，信号空間ダイヤグラム上で原点を通過することはない．

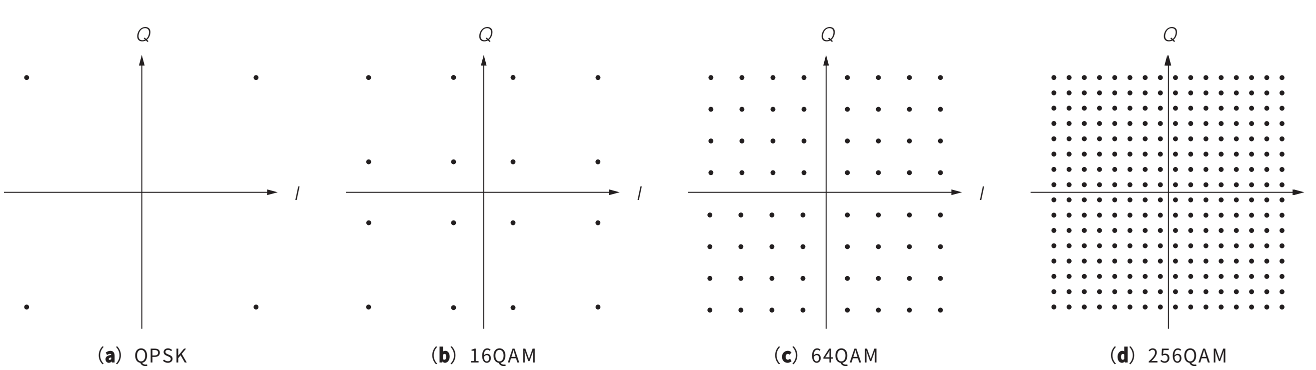


図14　各種多値変調方式の概要

位相と振幅に情報を載せることにより，同一時間間隔で伝送できるビット数を引き上げることができる．

ります．そして，この複数チャネルを受信側で分離させるための識別子を付けます．**図16（a）**の例では符号をその識別子として用い，**図16（b）**の例では相異なる周波数をその識別子として用いています．受信側では，この識別子をもう一度受信信号に乗算し，相関をとり，送信信号のどの信号に近いかを調べてデータの受信を行います．

このようにQPSKやQAMをベースとして，符号を識別子としてさらに高能率な伝送を目指す方法を「符号分割多重（マルチコード）伝送方式」，また識別子として周波数を用いるものを「周波数分割多重（マルチキャリア）伝送方式」といいます．現在，地上ディジタル放送や無線LANで用いられているOFDMは，この周波数分割多重伝送方式のうちの一つで，各周波数を識別子として掛け合わせるときに逆フーリエ変換を用い，各周波数成分を受信側で調べるときにフーリエ変換を用いることを特徴としています．

3. QPSK/QAMのシステム・レベル・シミュレーション

以上のように，現在，ワイヤレス・システムで使用されている変調方式は，基本的には直交変調方式を基本にしています．次に，この直交変調方式のうち，QPSK方式，およびQAM方式を例に，システム・レベル・シミュレーションを行います．

今回のシミュレーションにはThe MathWorks社のMATLAB/Simulink（Release i3またはi4）を利用しました．また，本誌付属のDVD-ROMには，以下の五つのファイルが収録されています．

- **qam_mod.mdl** ――本システム・レベル・シミュレーションのSimulinkモデル
- **qammod_sim.m** ――qamの変調部のSimulink組み込み用MATLABモデル
- **comp2.dll** ――入力データを判定する比較器
- **conv_sim_i.m**――*I*チャネルの信号に対してナイキスト・フィルタをかけるSimlink組み込み用MATLABモデル
- **conv_sim_q.m**――*Q*チャネルの信号に対してナイキスト・フィルタをかけるSimlink組み込み用MATLABモデル

MATLAB/Simulinkをお持ちの方は，実際に動作させて確認してみていただければと思います．

本システム・レベル・シミュレーションでは，qam_mod.mdlを用いてシミュレーションを行います．このモデルは，**図17**のような形をしています．変調の方法は**図7**，**図13**の説明と基本的に同じです．これにのっとってモデルを作成します（起動する場合はqam_mod.mdlを直接ダブルクリックする）．

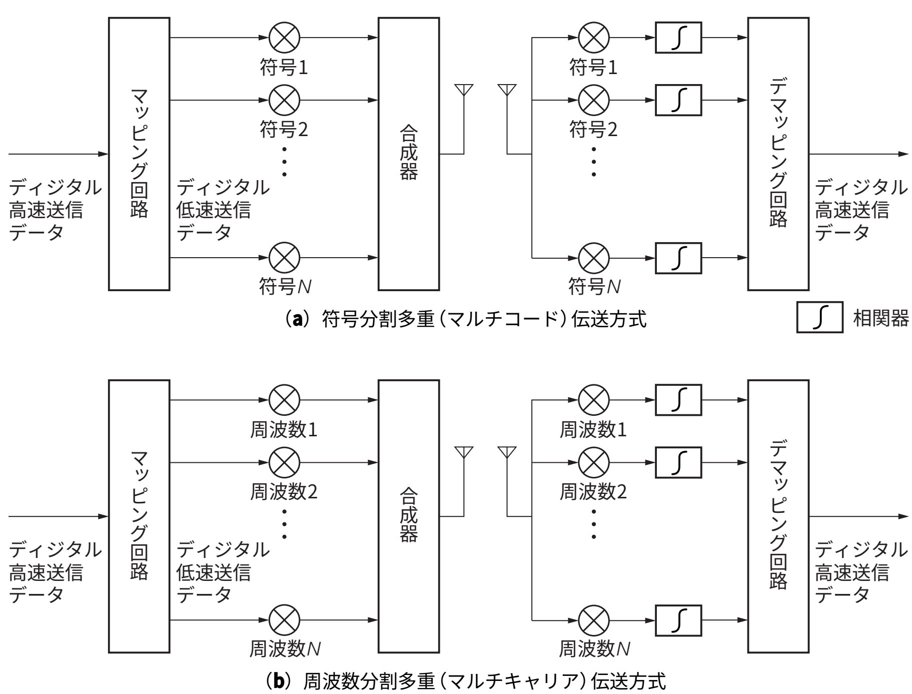


図16 高速化の手段
高速化の手段として，それぞれの情報を符号で秘匿化し，多重して伝送する方法と，複数の周波数を利用して伝送する方法がある．

● **QPSK/QAMモデルは6種類のモジュールから構成**

qam_mod.mdlのモデルは，以下の6種類のモジュールからなります．以下にその概要を示します．

1）QAM_inputgenモジュール

QAM_inputgenモジュールは送信する信号（'0'または'1'）を生成します．内部のモジュールは**図18**のようになっています．Uniform Random Numberブロックによって0から1までのランダム信号を生成し，comp2というブロックで0.5をしきい値にして，'0'か'1'を発生させています．

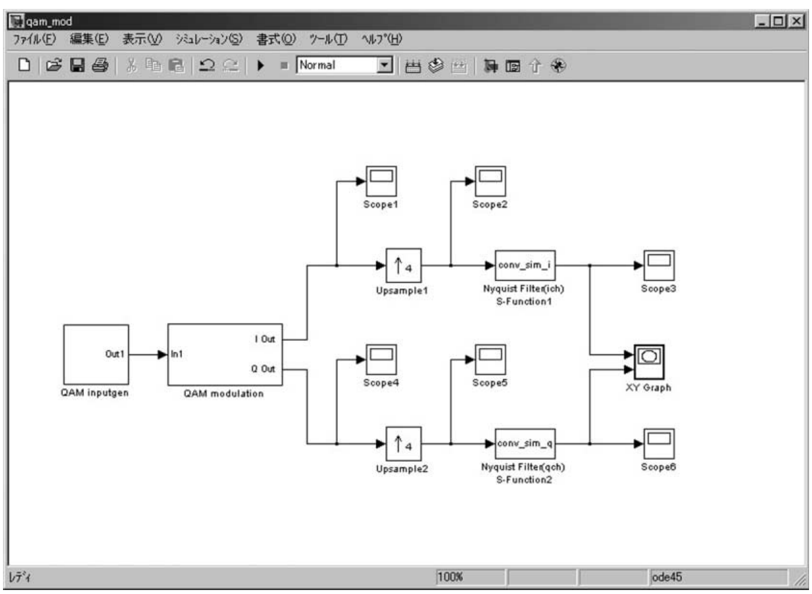
2）QAM_modulationモジュール

QAM_modulationモジュールでは，送信する信号をIチャネルの信号とQチャネルの信号に分配し，それぞれの振幅レベルを決定します（式(3)を参照）．

モジュールをダブルクリックすると，**図19**のようなパラメータを設定するウィンドウが出てきます．まず，Modulation levelパラメータを設定します．これは，一度に何ビットの信号の伝送を行うかということです．例えばQPSK，16QAM，64QAM，256QAMの場合は，それぞれ2，4，6，8と入力します．次はNormalized valueです．これは振幅をある一定の範囲にしたいときに入力します．入力した値nの逆数$(1/n)$の振幅レベルに正規化されます．残りのパラメータはこのままで固定してください．

3）Upsampleモジュール

Upsampleモジュールでは，フィルタをかけやすくするために，送信するべきIチャネルとQチャネルの各信号ごとに'0'を挿入します（**図7**を参照）．今回は，4サンプルごとにデータが出るようにしています．このモジュールはRelease i3ではDSP Blocksetの中に，Release i4ではSignal Processing Blocksetにあります．



◀**図17　QAM変調器のシステム・レベル・シミュレーション**
変調器のSimulink上のモデルを示す．

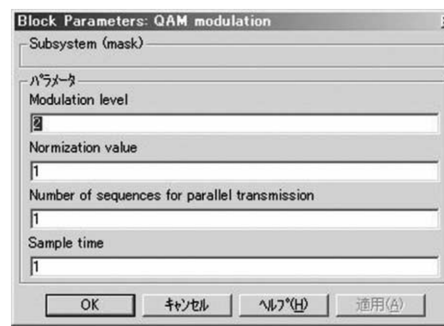
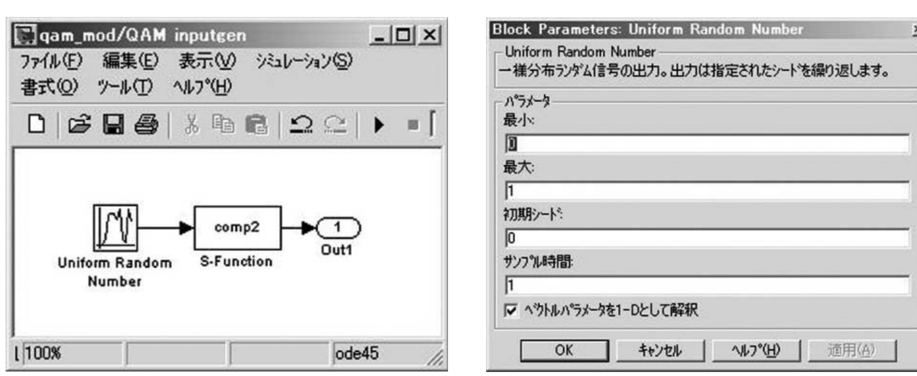


図19　QAM_modulationモジュールの設定ウィンドウ
QAM_modulationモジュールのパラメータ設定ウィンドウを示す．

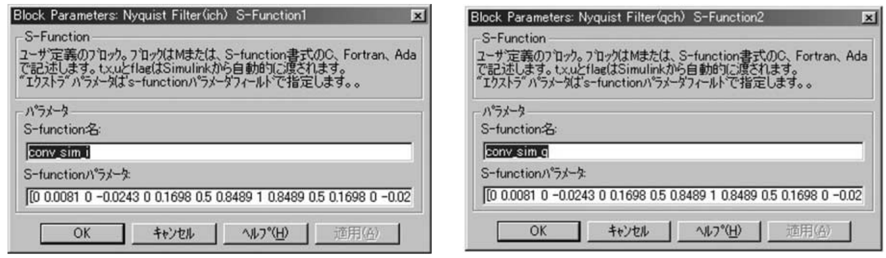


（a）内部構成　（b）設定ウィンドウ

図18
QAM_inputgenモジュール
QAM_inputgenモジュールの内部構成とパラメータ設定ウィンドウを示す．

表1　フィルタ係数xh

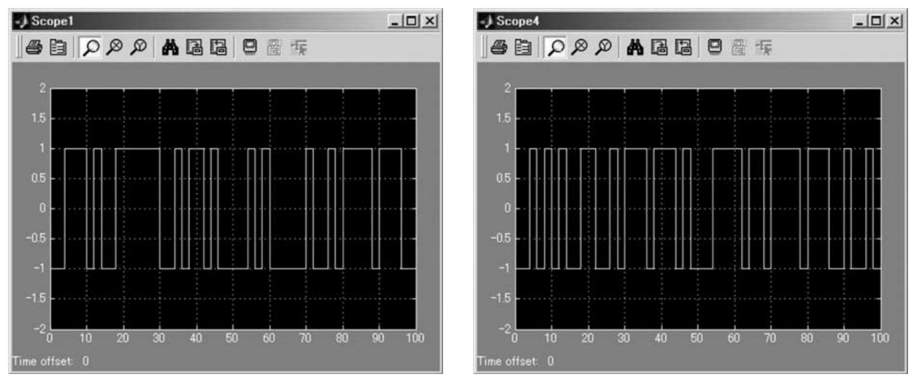
タップ係数	シミュレーション	実　機
xh(1)	0	0
xh(2)	0.0081	66
xh(3)	0	0
xh(4)	−0.0243	−199
xh(5)	0	0
xh(6)	0.1698	1391
xh(7)	0.5	4096
xh(8)	0.8489	6954
xh(9)	1	8192
xh(10)	0.8489	6954
xh(11)	0.5	4096
xh(12)	0.1698	1391
xh(13)	0	0
xh(14)	−0.0243	−199
xh(15)	0	0
xh(16)	0.0081	66
xh(17)	0	0



(**a**) 設定ウィンドウ(*I*チャネル)　(**b**) 設定ウィンドウ(*Q*チャネル)

図20　Nyquist フィルタ・モジュール

Nyquistフィルタ・モジュール(*I*チャネル，*Q*チャネル)のパラメータ設定ウィンドウを示す．



(**a**) Scope1(*I*チャネル)　(**b**) Scope4(*Q*チャネル)

図21　QPSK変調器においてマッピングされたデータ

***I*チャネルと*Q*チャネルに分離できていることがわかる．**

リスト2　Nyquist_filterブロックにおける畳み込みの計算

```
global tap_i

data=u(1);

ln=length(tap_i);
tap_i(2:ln)=tap_i(1:ln-1);
tap_i(1)=data;
sys(1)=sum(tap_i.*xh);
```

4) Nyquist_filterモジュール

Nyquist_filterモジュールは，**図9**に示すナイキスト・フィルタをかけるモジュールです．*I*チャネル，*Q*チャネルそれぞれをクリックすると，**図20**に示す設定ウィンドウが出てきます．*I*チャネル，*Q*チャネルともに入力されるデータ系列に対して**図7**のようにフィルタの窓をかけます．このフィルタの窓の形を示す係数をタップと呼びます．

本シミュレーションでは後の章でも使用する**表1**に示す17個のデータからなるフィルタ係数xhを入力データにかけます．シミュレーションでは最大の値を1にしたものを用いますが，実機を作る際には小数はあまり使用しないので，すべてを整数化したものを使用します．

次にフィルタのかけかたの例を**リスト2**に示します．ここで入力データは11(1)です．この例では入力されたデータを一つずつtap-iというレジスタに入れます．そして次の時間周期ではそのレジスタを1シフトさせ，また新しいデータを入力します．そして最終的にこのシフト・レジスタの値とshとをそれぞれかけ合わせ，その総和をフィルタ出力とします．これを計算する関数がconv_sim_i.msとconv_sim_g.mです．それぞれのブロックの設定ウィンドウにこの関数を入れ，パラメータとしてタップ関数を入力します．ここでは**表1**のものを用いています．

5) Scopeモジュール

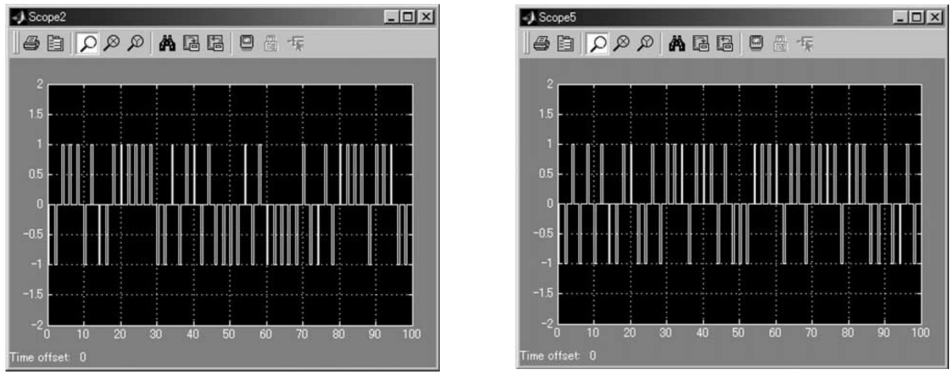
Scopeモジュールは，各地点の信号を観測するためのモジュールです．

6) XYGraphモジュール

XYGraphモジュールは，*I*チャネルの信号を横軸にとり，*Q*チャネルの信号を縦軸にとったときの信号空間ダイヤグラムを示します．

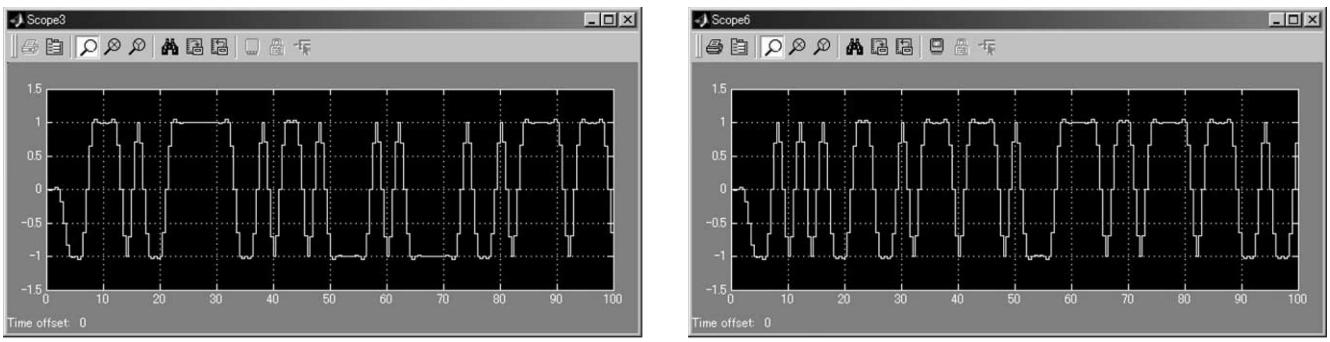
● システム・レベル・シミュレーションを実行

ではQPSK変調器のシミュレーションを行ってみましょう．QAM_modulationモジュールのModulation levelのパラメータが「2」であることを確認し，ツール・バーの「シミュレーション」→「シミュレーション・パラメータ」を選択し，シミュレーション時間を適当に設定します．さらに，



（**a**）Scope2（*I* チャネル）　（**b**）Scope5（*Q* チャネル）

図22
QPSK変調器においてアップサンプルされたデータ
フィルタをかけることができるように，各データの間に‘0’を挿入している．



（**a**）Scope3（*I* チャネル）　（**b**）Scope6（*Q* チャネル）

図23　QPSK変調器においてフィルタリングされたデータ
QPSKの変調波として帯域制限されていることがわかる．

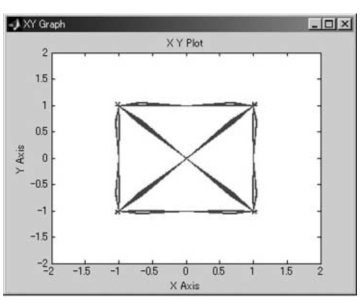
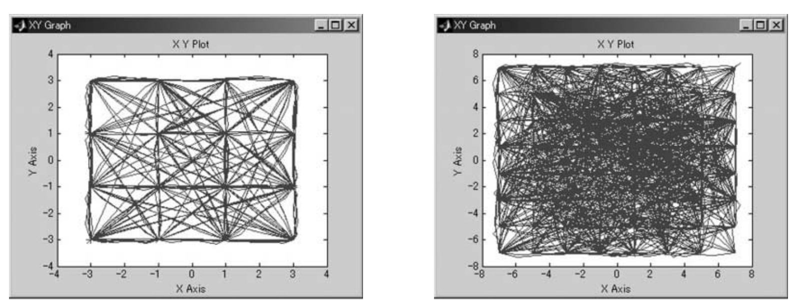


図24　信号点の推移
QPSKなので，4点にデータが絞られていることがわかる．



（**a**）16QAM　（**b**）64QAM

図25　16QAM，64QAMの信号点の推移
伝送するべきデータが多値化しても，本シミュレータを使用できる．

ツール・バーの「シミュレーション」→「開始」を選んでシミュレーションを実行してください．

まず，**図17**のScope1とScope4を開いてみると，**図21**に示すデータが生成されます．次に，Upsample後のScope2とScope5を見てみると，**図22**のようにデータ間に‘0’が挿入されていることがわかります．そして，Scope3とScope6を見ると，**図23**のようにフィルタがかけられたデータが出てきます．

XYGraphを見ると，**図24**に示すように信号点は4点を中心として変調がかかっていることがわかります．さらにQAM_modulationモジュールのModulation levelのパラメータを「4」，「8」と変え，QAM変調器のシミュレーションを行うと，**図25**のような信号点を見ることができます．

はらだ・ひろし
独立行政法人 情報通信研究機構